

	In Betrieb befindliche, mit Mineralöl imprägnierte elektrische Geräte Leitfaden zur Interpretation der Analyse gelöster und freier Gase (IEC 60599:1999) Deutsche Fassung EN 60599:1999	DIN EN 60599
VDE	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Vorstand beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter nebenstehenden Nummern in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der etz Elektrotechnische Zeitschrift bekanntgegeben worden.	Klassifikation VDE 0370 Teil 7
Diese Norm enthält die deutsche Übersetzung der Internationalen Norm IEC 60599 ICS 29.040.10 Mineral oil-impregnated electrical equipment in service – Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis (IEC 60599:1999); German version EN 60599:1999 Matériels électriques imprégnés d'huile minérale en service – Guide pour l'interprétation de l'analyse des gaz dissous et des gaz libres (CEI 60599:1999); Version allemande EN 60599:1999 Die Europäische Norm EN 60599:1999 hat den Status einer Deutschen Norm. Beginn der Gültigkeit Die EN 60599 wurde am 1999-01-01 angenommen. Norm-Inhalt war veröffentlicht als E DIN IEC 10/418/CDV (VDE 0370 Teil 7):1998-02. Fortsetzung Seite 2 und 28 Seiten EN Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE) Normenausschuß Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Fachausschuß Mineralöl- und Brennstoffnormung (FAM) des NMP		

Nationales Vorwort

Für die vorliegende Norm ist das nationale Arbeitsgremium K 182 „Flüssigkeiten und Gase für elektrotechnische Anwendung“ der Deutschen Elektrotechnischen Kommission im DIN und VDE (DKE) zuständig.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Der Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist nachstehend wiedergegeben. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Norm waren die angegebenen Ausgaben gültig.

IEC hat 1997 die Benummerung der IEC-Publikationen geändert. Zu den bisher verwendeten Normnummern wird jeweils 60000 addiert. So ist zum Beispiel aus IEC 599 nun IEC 60599 geworden. In der folgenden Konkordanzliste sind bereits die neuen Normnummern angegeben.

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
–	IEC 60050(191):1990	IEV Kapitel 191:1995-12	–
–	IEC 60050(212):1990	IEV Kapitel 212:1997-07	–
–	IEC 60050(604):1987	IEV Kapitel 604:1989-01	–
EN 60567:1992	IEC 60567:1992	DIN EN 60567 (VDE 0370 Teil 9):1994-06	VDE 0370 Teil 9
EN 61198:1994	IEC 61198:1993	DIN EN 61198 (VDE 0380 Teil 6):1995-03	VDE 0380 Teil 6

Hinweis zum Umgang mit Chemikalien:

Der Umgang mit den in dieser Norm genannten Chemikalien muß mit entsprechender Sorgfalt erfolgen, und es sind in Deutschland bei der Entsorgung die diesbezüglichen Verordnungen zu beachten. Es wird daher in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, daß neben irgendwelchen Empfehlungen in anderen internationalen Normen die jeweils relevanten national bzw. regional gültigen Rechtsvorschriften zu beachten sind.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60567 (VDE 0370 Teil 9)	Anleitung für die Probenahme von Gasen und von Öl aus ölgefüllten elektrischen Betriebsmitteln und für die Analyse freier und gelöster Gase (IEC 60567:1992); Deutsche Fassung EN 60567:1992
DIN EN 61198 (VDE 0380 Teil 6)	Isolieröle auf Mineralölbasis – Prüfverfahren zur Bestimmung von Furfurol und verwandten Verbindungen (IEC 61198:1993); Deutsche Fassung EN 61198:1994
IEV Kapitel 191	IEV – Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Kapitel 191: Zuverlässigkeit und Dienstgüte; Identisch mit IEC 60050(191):1990
IEV Kapitel 212	IEV – Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Kapitel 212: Isolierende Feststoffe, Flüssigkeiten und Gase; Identisch mit IEC 60050(212):1990
IEV Kapitel 604	IEV – Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Kapitel 604: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie – Betrieb

Deutsche Fassung

In Betrieb befindliche, mit Mineralöl imprägnierte elektrische Geräte
Leitfaden zur Interpretation der Analyse gelöster und freier Gase
(IEC 60599:1999)

Mineral oil-impregnated electrical equipment
in service – Guide to the interpretation of
dissolved and free gases analysis
(IEC 60599:1999)

Matériels électriques imprégnés d'huile minérale
en service – Guide pour l'interprétation de l'analyse
des gaz dissous et des gaz libres
(CEI 60599:1999)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 1999-01-01 angenommen.

Die CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Zentralsekretariat oder bei jedem CENELEC-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CENELEC-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Zentralsekretariat mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees von Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Spanien, der Tschechischen Republik und dem Vereinigten Königreich.

CENELEC

Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

Zentralsekretariat: rue de Stassart 35, B-1050 Brüssel

Vorwort

Der Text des Schriftstücks 10/450/FDIS, zukünftige 2. Ausgabe von IEC 60599, ausgearbeitet vom TC 10 „Fluids for electrotechnical applications“, wurde der IEC-CENELEC Parallelen Abstimmung unterworfen und von CENELEC am 1999-01-01 als EN 60599 angenommen.

Diese Europäische Norm ersetzt HD 397 S1:1979.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem die EN auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muß (dop): 2000-01-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2000-01-01

Anhänge, die als „normativ“ bezeichnet sind, gehören zum Norm-Inhalt.

Anhänge, die als „informativ“ bezeichnet sind, enthalten nur Informationen.

In dieser Norm ist Anhang ZA normativ, und die Anhänge A, B und C sind informativ.

Der Anhang ZA wurde von CENELEC hinzugefügt.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 60599:1999 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

Inhalt

	Seite
Einleitung	3
1 Anwendungsbereich	4
2 Normative Verweisungen	4
3 Begriffe und Abkürzungen	4
4 Mechanismen der Gasbildung	6
5 Identifizierung der Fehler	7
6 Bedingungen zur Berechnung der Quotienten	10
7 Anwendung auf freie Gase im Gasrelais	10
8 Gaskonzentrationswerte während des Betriebes	12
9 Empfohlene Methode der DGA-Interpretation (Bild 1)	13
10 Ergebnisbericht.	14
Anhang A (informativ) Anwendungshinweise für spezielle Geräte	16
Anhang B (informativ) Graphische Darstellung von Gasquotienten (siehe 5.9)	24
Anhang C (informativ) Literaturverzeichnis	27
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	28
Bild 1: Flußdiagramm.	15
Bild B.1: Graphische Darstellung 1 von Gasquotienten (siehe [3] im Anhang C)	24
Bild B.2: Graphische Darstellung 2 von Gasquotienten (siehe [4] im Anhang C)	25
Bild B.3: Graphische Darstellung 3 von Gasquotienten – Duvals Dreieck (siehe [5] im Anhang C)	26

Einleitung

Die Analyse gelöster und freier Gase (DGA) ist eines der am meisten benutzten diagnostischen Hilfsmittel zur Erkennung und Bewertung von Fehlern in elektrischen Geräten. Jedoch ist die Interpretation der DGA-Ergebnisse oft kompliziert und sollte immer mit Sorgfalt durchgeführt werden und Wartungspersonal, das Erfahrung mit dem Isolationssystem hat, involvieren.

Der vorliegende Leitfaden enthält Informationen, die zur Erleichterung dieser Interpretation dienen. Die erste, 1978 veröffentlichte Ausgabe hat der Industrie gut gedient, hatte aber Einschränkungen, wie z. B. das Fehlen einer Diagnose in einigen Fällen, keine Angabe über Konzentrationsgrenzen und die Tatsache, daß sie hauptsächlich auf Erfahrung mit Leistungstransformatoren basierte. Die vorliegende zweite Ausgabe versucht, einige dieser Mängel zu beseitigen. Die Interpretations-Schemata basieren auf Beobachtungen, die an einer großen Anzahl fehlerhafter, ölgefüllter Geräte nach der Inspektion gemacht wurden und auf Konzentrationsgrenzen, abgeleitet aus weltweit gesammelten Analysen.

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm ist ein Leitfaden, der beschreibt, wie die Konzentrationen gelöster oder freier Gase interpretiert werden können, um den Zustand in Betrieb befindlicher ölgefüllter, elektrischer Geräte zu diagnostizieren und Aktionen in der Zukunft vorzuschlagen.

Dieser Leitfaden gilt für elektrische Geräte, die mit Mineralöl gefüllt sind und Papier auf Zellulosebasis oder Preßspan als feste Isolation besitzen. Informationen für spezifische Gerätearten wie Transformatoren (Leistungstransformatoren, Meßwandler, Industrie-, Eisenbahn-, Verteilungstransformatoren), Drosseln, Durchführungen, Schaltanlagen und ölgefüllte Kabel in den Anwendungshinweisen (siehe [Anhang A](#)) sind nur als erste Näherung zu verwenden.

Dieser Leitfaden darf nur mit Vorsicht auf andere Flüssig-/Fest-Isoliersysteme angewendet werden.

Auf jeden Fall sollten die erzielten Angaben nur als Näherung betrachtet werden, und jede daraus resultierende Handlung sollte nur mit technisch kompetenter Beurteilung durchgeführt werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Normen enthalten Festlegungen, die durch Verweisung in diesem Text Bestandteil der vorliegenden Internationalen Norm sind. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Norm waren die angegebenen Ausgaben gültig. Alle Normen unterliegen der Überarbeitung, und Vertragspartner, deren Vereinbarungen auf dieser Internationalen Norm basieren, werden gebeten, die Möglichkeit zu prüfen, ob die jeweils neuesten Ausgaben der im folgenden genannten Normen angewendet werden können. Die Mitglieder von IEC und ISO führen Verzeichnisse der gegenwärtig gültigen Internationalen Normen.

IEC 60050(191):1990	<i>International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 191: Dependability and quality of service</i>
IEC 60050(212):1990	<i>International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 212: Insulation solids, liquids and gases</i>
IEC 60050(604):1987	<i>International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 604: Generation, transmission and distribution of electricity – Operation</i>
IEC 60567:1992	<i>Guide for sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and for the analysis of free and dissolved gases</i>
IEC 61198:1993	<i>Mineral insulating oils – Method for the determination of 2-furfural and related compounds</i>

3 Begriffe und Abkürzungen

Für die Anwendung dieser Internationalen Norm gelten die folgenden Begriffe, von denen einige von IEC 60050(191), IEC 60050(212) und IEC 60050(604) abgeleitet wurden:

3.1.1 Fehler

ein unerwartetes Ereignis oder ein Defekt in einem Gegenstand, was zu einer Störung oder mehreren Störungen des Gegenstandes selbst oder anderer verbundener Geräte führen kann. [IEV 604-02-01]

ANMERKUNG: In dem elektrischen Gerät kann ein Fehler zu einem oder keinem Schaden an der Isolierung führen und eine Störung des Gerätes bewirken.

3.1.2 Fehler ohne Schadenfolge

ein Fehler, der weder eine Reparatur noch eine Austauschaktion an der Fehlerquelle erfordert. [IEV 604-02-09]

ANMERKUNG: Typische Beispiele sind selbstverlöschende Lichtbögen in Schaltanlagen oder allgemeine Überhitzung ohne Papierverkohlung.

3.1.3 Fehler mit Schadenfolge

ein Fehler, der eine Reparatur oder Austauschaktion erfordert. [IEV 604-02-08, modifiziert]

3.1.4 Vorfall

ein Ereignis, verbunden mit einem internen Fehler, der zeitweise oder ständig den normalen Betrieb eines Gerätes stört. [IEV 604-02-03, modifiziert]

ANMERKUNG: Typische Beispiele sind Gasalarm, Schalten des Gerätes oder Leckage des Gerätes.

3.1.5 Störung

die Beendigung der Fähigkeit eines Gegenstandes, eine geforderte Funktion auszuführen. [IEV 191-04-01]

ANMERKUNG: In dem elektrischen Gerät resultiert die Störung aus einem zu Schaden führenden Fehler oder ereignisreichen Ausfall, zu Reparatur oder Austausch des Gerätes wie z. B. nach internem Ausfall, Bruch des Kessels, Feuer oder Explosion.

3.1.6 elektrischer Fehler

Teilentladung oder zerstörende Entladung durch die Isolierung hindurch.

3.1.7 Teilentladung

eine Entladung, die die Isolierung zwischen Leitern nur teilweise überbrückt. Sie kann innerhalb der Isolation oder benachbart zu einem Leiter erfolgen. [IEV 212-01-34, modifiziert]

ANMERKUNG 1: Eine Korona-Entladung ist eine Form der Teilentladung, die in gasförmigen Medien um Leiter, die frei von fester oder flüssiger Isolierung sind, passiert. Dieser Begriff darf nicht generell für alle Formen von Teilentladung verwendet werden.

ANMERKUNG 2: X-Wachs ist ein festes Material, das aus Mineralöl als Folge von elektrischen Entladungen gebildet wird und das aus polymerisierten Molekülbruchstücken der Originalflüssigkeit besteht [IEV 212-07-24, modifiziert]. Ähnliche Produkte können aus anderen Flüssigkeiten unter ähnlichen Bedingungen gebildet werden.

ANMERKUNG 3: Sprühentladung niedriger Energie, zum Beispiel als Folge von Metallen oder fluktuierenden Potentialen, wird manchmal als Teilentladung beschrieben, sollte aber eher als Entladung niedriger Energie betrachtet werden.

3.1.8 Entladung (zerstörend)

das Überspringen eines Lichtbogens nach dem Durchschlag der Isolierung. [IEV 604-03-38, modifiziert]

ANMERKUNG 1: Entladungen werden oft als Lichtbogen, Durchschlag oder Kurzschluß beschrieben. Es werden aber auch die folgenden spezifischeren Ausdrücke benutzt:

- Funkenüberschlag (Entladung durch das Öl);
- Durchschlag (Entladung durch die feste Isolierung hindurch);
- Überschlag (Entladung an der Oberfläche der festen Isolierung);
- Kriechwegbildung (der fortschreitende Abbau der Oberfläche fester Isolierung durch örtliche Entladungen, die leitende oder teilweise leitende Spuren bilden);
- Sprühentladungen, die in der Übereinkunft mit der Physik, örtliche dielektrische Durchschläge hoher Ionisationsdichte oder kleine Lichtbögen sind.

ANMERKUNG 2: Je nach Höhe der Energie, die in der Entladung enthalten ist, wird sie als eine Entladung niedriger oder hoher Energie beschrieben, basierend auf dem Ausmaß des Schadens, der an den Geräten beobachtet wurde (siehe 5.2).

3.1.9 thermischer Fehler

übermäßige Temperaturerhöhung in der Isolierung.

ANMERKUNG: Typische Ursachen sind:

- ungenügende Kühlung;
- übermäßige Ströme, die in anliegenden Metallteilen (als ein Ergebnis schlechter Kontakte, Eddy-Ströme, Streuverluste oder Leckfluß) zirkulieren;
- übermäßige Ströme, die durch die Isolierung (als ein Ergebnis hoher dielektrischer Verluste) zirkulieren, führen zu einem thermischen Abdriften;
- Überhitzung interner Windungs- oder Durchführungsverbindungen.

3.1.10 typische Werte von Gaskonzentration

Gaskonzentrationen, die üblicherweise bei solchen in Betrieb befindlichen Geräten gefunden werden, die keinerlei Anzeichen von Fehlern haben und die nur von einem willkürlichen Prozentsatz von höheren Gasgehalten, zum Beispiel 10 %, überschritten werden (siehe 8.2.1).

ANMERKUNG 1: Typische Werte werden sich für unterschiedliche Gerätetypen und für unterschiedliche Netzwerke, abhängig von den Betriebsbedingungen (Last, Temperatur usw.), unterscheiden.

ANMERKUNG 2: Typische Werte werden in vielen Ländern und von vielen Anwendern als „Normalwerte“ betrachtet. Aber dieser Begriff wird hier nicht verwendet, um mögliche Fehlinterpretationen zu vermeiden.

3.2 Abkürzungen

3.2.1 Chemische Namen und Symbole

Name	Symbol
Stickstoff	N ₂
Sauerstoff	O ₂
Wasserstoff	H ₂
Kohlenmonoxid	CO
Kohlendioxid	CO ₂
Methan	CH ₄
Ethan	C ₂ H ₆
Ethen (Ethylen)	C ₂ H ₄
Ethin (Acetylen)	C ₂ H ₂

3.2.2 Allgemeine Abkürzungen

DGA: Gas-in-Öl-Analyse (**D**issolved **g**as **a**nalysis)
CIGRE: Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques
S: Analytische Nachweisgrenze

4 Mechanismen der Gasbildung

4.1 Zersetzung von Öl

Mineralöle sind aus einer Mischung verschiedener Kohlenwasserstoff-Moleküle, die CH_3 -, CH_2 - und CH -Gruppen enthalten, gemacht. Diese Gruppen sind über Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen miteinander verbunden. Spaltung von einigen der C-H- und C-C-Verbindungen kann als Ergebnis elektrischer und thermischer Fehler, mit der Bildung kleiner unbeständiger Fragmente in radikalischer oder ionischer Form, wie z. B. $\text{H}^\bullet$, $\text{CH}_3^\bullet$, $\text{CH}_2^\bullet$, $\text{CH}^\bullet$ oder $\text{C}^\bullet$ (unter vielen anderen, komplexeren Formen), geschehen. Diese Fragmente rekombinieren schnell durch komplizierte Reaktionen zu Gasmolekülen, wie z. B. Wasserstoff (H_2), Methan (CH_4), Ethan (C_2H_6), Ethen (C_2H_4) oder Ethin [Acetylen] (C_2H_2). C_3 - und C_4 -Kohlenwasserstoffgase wie auch feste Teilchen von Kohlenstoff und Kohlenwasserstoffpolymeren (X-Wachs) sind andere mögliche Rekombinationsprodukte. Die Gase, die gebildet werden, lösen sich in Öl oder sammeln sich als freie Gase an, falls sie schnell in großen Mengen gebildet werden, und können mittels DGA nach IEC 60567 analysiert werden.

Fehler niedriger Energie, wie z. B. Teilentladungen des kalten Plasmatypes (Korona-Entladungen), begünstigen durch Ionisierungsreaktionen die Spaltung der schwächsten C-H-Bindung (338 kJ/mol) und die Bildung von Wasserstoff als das Hauptrekombinationsgas. Mehr Energie und/oder höhere Temperaturen werden für die Spaltung der C-C-Bindung und ihre Rekombination in Gase mit einer C-C-Einfachbindung (607 kJ/mol), C=C-Doppelbindung (720 kJ/mol) oder C≡C-Dreifachbindung (960 kJ/mol) gebraucht. Die Prozesse dazu haben einige Ähnlichkeiten mit jenen, die beim Crack-Prozeß in der Erdölindustrie beobachtet werden.

Ethen wird daher vor Ethan und Methan bei Temperaturen über etwa 500 °C begünstigt (obwohl es auch noch bei tieferen Temperaturen in kleineren Mengen vorhanden ist). Ethin-Bildung erfordert Temperaturen von mindestens 800 °C bis 1200 °C und ein schnelles Absinken auf tiefere Temperaturen, um sich als ein stabiles Rekombinationsprodukt anzusammeln. Ethin wird daher hauptsächlich in Lichtbögen gebildet, wo der leitende Ionenkanal mehrere tausend Grad Celsius heiß ist und die Schnittstelle mit dem umgebenden flüssigen Öl notwendigerweise unter 400 °C (Temperatur, über welcher das Öl komplett verdampft) ist. Dazwischen befindet sich eine Schicht aus Öldampf/Zersetzungsgasen. Ethin kann auch bei niedrigen Temperaturen (< 800 °C) gebildet werden, aber nur in sehr kleinen Mengen. Kohlenstoff-Teilchen bilden sich bei 500 °C bis 800 °C und werden tatsächlich nach Lichtbögen im Öl oder um sehr heiße Stellen herum beobachtet.

Öl kann unter Bildung kleiner Mengen von CO und CO_2 oxydieren. Diese Gase können sich über längere Zeiträume in beträchtlicheren Mengen ansammeln.

4.2 Zersetzung der Zelluloseisolierung

Die Polymerketten der festen Zelluloseisolierung (Papier, Preßspan, Holzblöcke) enthalten eine große Zahl von Anhydroglucose-Ringen mit schwachen C-O-Bindungen und glykosidischen Bindungen, die thermisch weniger stabil sind als die Kohlenwasserstoffbindungen des Öls und die sich bei niedrigeren Temperaturen zersetzen. Signifikante Spaltung der Polymerkette geschieht bei Temperaturen über 105 °C, vollständige Zersetzung und Karbonisierung bei Temperaturen über 300 °C. Hauptsächlich werden sowohl Kohlenmonoxid und Kohlendioxid als auch Wasser in viel größeren Mengen gebildet als durch Oxidation des Öls bei gleicher Temperatur. Gleichzeitig entstehen in geringen Mengen Kohlenwasserstoff-Gase und Furan-Derivate. Letztere können nach IEC 61198 analysiert werden und ergänzen die DGA-Interpretation, und es kann dadurch bestätigt werden, ob oder ob keine Zelluloseisolierung an einem Fehler beteiligt ist. CO- und CO_2 -Bildung steigt nicht nur mit der Temperatur an, sondern auch mit dem Sauerstoffgehalt des Öls und dem Feuchtigkeitsgehalt des Papiers.

4.3 Andere Gasquellen

Gase können in einigen Fällen nicht als Folge von Fehlern in den Geräten entstehen, sondern durch Rostvorgänge oder andere chemische Reaktionen, an denen Stahl, unbeschichtete Oberflächen oder Schutzanstriche beteiligt sind.

Wasserstoff kann durch Reaktion von Stahl mit Wasser produziert werden, solange Sauerstoff aus dem Öl zur Verfügung steht. Daher werden große Mengen von Wasserstoff auch in einigen Transformatoren beobachtet, die nie unter Last waren. Wasserstoff kann ebenfalls durch Reaktion von freiem Wasser mit speziellen Überzügen auf Metalloberflächen oder durch katalytische Reaktion einiger Edelstahlsorten mit Öl, insbesondere mit sauerstoffhaltigem Öl bei erhöhten Temperaturen, gebildet werden. Wasserstoff kann auch aus neuem Edelstahl gebildet werden, der während seines Herstellungsverfahrens dieses Gas absorbierte oder durch das Schweißen entstanden ist und dann langsam in das Öl wandert.

Wasserstoff kann auch durch Zersetzung des dünnen Ölfilms zwischen überhitzten Kernblechen bei Temperaturen von 140 °C und höher gebildet werden (siehe [1]* des Anhangs C).

*) Ziffern in eckigen Klammern beziehen sich auf die Literaturangabe in Anhang C.

Gase können auch erzeugt werden, wenn das Öl Sonnenlicht ausgesetzt ist oder aber auch während einer Reparatur des Gerätes.

Transformator-Innenanstrichstoffe, wie z. B. Alkyd-Harze und modifizierte Polyurethane, die Fettsäuren in ihrer Formulierung beinhalten, können ebenfalls Gase bilden.

Diese Möglichkeiten sind jedoch sehr selten und können durch DGA-Analyse an neuen Geräten, die nie unter Last waren, sowie durch Materialverträglichkeitstests identifiziert werden. Die Anwesenheit von Wasserstoff bei gleichzeitiger Abwesenheit der anderen Kohlenwasserstoff-Gase kann zum Beispiel ein Anzeichen eines solchen Problems sein.

ANMERKUNG: Der Fall, daß sich Gase bei einem früheren Fehler gebildet haben und noch im Transformator vorhanden sind, ist in 5.3 behandelt.

5 Identifizierung der Fehler

Jede Gasbildung während des Betriebs, sei sie auch gering, resultiert aus irgendeiner Art von Belastung, auch wenn sie sehr schwach ist, wie die übliche Alterung durch Temperatur. Solange jedoch die Gasbildung unterhalb typischer Werte ist, darf sie nicht als Hinweis auf einen „Fehler“ betrachtet werden, sondern als „typische Gasbildung“ (siehe Bild 1).

5.1 Zusammensetzung der gelösten Gase

Obwohl die Bildung einiger Gase je nach erreichter Temperatur oder nach der Energie, die in einem Fehler (siehe 4.1) steckt, begünstigt ist, wird man in der Praxis fast immer eine Mischung von Gasen erhalten. Einer der Gründe ist thermodynamischer Art: Obwohl sie nicht begünstigt sind, werden sekundäre Gase ebenfalls gebildet, jedoch in geringen Mengen. Bestehende, aus der Erdöl-Industrie abgeleitete thermodynamische Modelle können jedoch nicht genau die Gaszusammensetzung, die gebildet wird, voraussagen, weil sie idealem Gas/Temperaturgleichgewicht entsprechen, das in tatsächlichen Fehlern nicht existiert. Große Temperaturgefälle geschehen in der Praxis, zum Beispiel als ein Ergebnis der Ölströmung oder Dampf Bildung entlang einer heißen Oberfläche. Dies gilt besonders im Falle von Lichtbogen mit Energiedurchsatz, der viel Wärme zur Schicht aus Öldampf/Zersetzungsgase überträgt, die sich zwischen dem Lichtbogen und dem Öl befindet. Dies erklärt wahrscheinlich die zunehmende Bildung von Ethen, das zusätzlich zu Ethin gebildet wird. Auch können bestehende thermodynamische Modelle nicht auf Papier angewandt werden, das bei Temperaturen über 300 °C unwiderruflich in Kohlenstoff übergeht.

5.2 Typen von Fehlern

Interne Inspektionen von hunderten fehlerhafter Geräte haben zu den folgenden breiten Klassen von visuell feststellbaren Fehlern geführt:

- Teilentladungen (PD) des kalten Plasma(Korona)-Typs, resultierend in X-Wachsbildung auf der Papierisolierung oder des Sprühentladung-Typs, der Nadellöcher, karbonisierte Perforationen (Löcher) im Papier, die jedoch nicht leicht zu finden sind, verursacht.
- Entladungen niedriger Energie (D1) in Öl und/oder Papier, nachgewiesen durch größere karbonisierte Perforationen durch das Papier (Löcher), Karbonisierung der Papieroberfläche (Kriechwegbildung) oder Kohlenstoffteilchen im Öl (wie bei Lastschaltvorgängen).
- Entladungen hoher Energie (D2) in Öl und/oder Papier, mit Energiedurchsatz, nachgewiesen durch umfangreiche Zerstörung und Karbonisierung des Papiers, Metallschmelze am Entladungsbereich, umfangreiche Karbonisierung des Öls und in einigen Fällen Abschalten des Geräts, das den großen Stromdurchsatz bestätigt.
- Thermische Fehler in Öl und/oder Papier unter 300 °C, falls das Papier sich bräunlich verfärbt hat (T1), und über 300 °C, falls es karbonisiert ist (T2).
- Thermische Fehler bei Temperaturen über 700 °C (T3), falls es Nachweis von Karbonisierung des Öls, Metallverfärbung (800 °C) oder Metallschmelze (> 1000 °C) gibt.

Tabelle 1: Abkürzungen

PD	Teilentladungen
D1	Entladungen niedriger Energie
D2	Entladungen hoher Energie
T1	Thermischer Fehler, $t < 300\text{ °C}$
T2	Thermischer Fehler, $300\text{ °C} < t < 700\text{ °C}$
T3	Thermischer Fehler, $t > 700\text{ °C}$